第36卷 第1期 中国腐蚀与防护学报 Vol.36 No.1
2016年2月 Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection Feb. 2016

沉积硫对FeS及$FeCO_3$膜结构及耐蚀性影响

沈秋燕 刘宏芳 刘烈炜

华中科技大学化学与化工学院 材料与环境化学研究所 武汉 430074

摘要: 在常压、80 ℃条件下采用阳极电解$NaHCO_3$溶液制备$FeCO_3$膜,利用Na_2S在高温下水解生成H_2S及H_2S与碳钢反应生成FeS的方法制备FeS膜。采用静态失重、电化学阻抗谱、动电位极化和环境扫描电镜等技术研究膜的耐蚀性能及沉积硫下膜的破坏规律。结果表明,pH值为7和3的模拟溶液中,无硫粉存在时$FeCO_3$和FeS膜均具有较好的耐蚀性,且$FeCO_3$膜的耐蚀性最好;与中性条件相比,膜在酸性溶液中耐蚀性较差。沉积硫下膜的耐蚀性基本失效,且在pH值为7时预膜试片均发生局部腐蚀,其中$FeCO_3$膜下的局部腐蚀最严重且从边缘扩展,FeS膜下腐蚀则较均匀,而在pH值为3时试样均属于均匀腐蚀。

关键词: $FeCO_3$膜 FeS膜 耐蚀性 硫沉积

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537(2016)01-0079-08

Influence of Sulfur Deposition on Corrosion Behavior of Carbon Steel L360 Covered with FeS- or $FeCO_3$-film

SHEN Qiuyan, LIU Hongfang, LIU Liewei

School of Chemistry and Chemical Engineering, Institute of Materials and Environmental Chemistry, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: A $FeCO_3$ film and FeS film were prepared on carbon steel L360 by anodic electrolyzing the steel in $NaHCO_3$ solution and immersing the steel in Na_2S solution respectively in air at 80 ℃. Then, the corrosion performance of the steel covered with the two films beneath sulfur-deposition in an artificial formation water was studied by means of electrochemical impedance spectroscopy (EIS), potentiodynamic polarization and environmental scanning electron microscope (ESEM). The results indicated that for the case without S deposits, the two films showed good protectiveness in the artificial solutions with pH 7 and 3 respectively, and the $FeCO_3$ film was better than the FeS film. The two films were better in the neutral solution than in acidic solution. However, for the case with S deposits, the two films loosed their protectiveness in the two solutions. Moreover, in the solution with pH 7, the steel beneath $FeCO_3$ film suffered from local corrosion seriously, while the steel beneath FeS film suffered from uniform corrosion. Besides, in the solution with pH 3, the steels with or without films all suffered from uniform corrosion.

Key words: $FeCO_3$ film, FeS film, corrosion resistance, sulfur deposition

1 前言

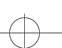
硫沉积腐蚀在化工领域中属于常见的腐蚀形态,也是腐蚀科学研究的热点,受到国内外学者的广泛关注[1-3]。Endo等[4]分析了近几年由S和氮化物组成的干沉积物在日本不同的区域沉积情况,并测出每年硫沉积的量为28~77 mmol·m^{-2}·a^{-1},且S占干沉积物的比例达10%~55%。硫沉积过程主要受环境介质的压力、温度及组成 (主要指CO_2/H_2S) 的影响[5]。Pack等[6]研究了S在天然气管道中的沉积存在区域选择性,并指出在管道T型交接处由于液气流比例较大硫沉积易在管道边缘发生,且易造成硫

定稿日期: 2015-03-25

作者简介: 沈秋燕,女,1990年生,硕士生

通讯作者: 刘烈炜,E-mail: liuliewei@126.com,研究方向为腐蚀与防护,环境化学,应用电化学

DOI: 10.11902/1005.4537.2015.030



沉积下局部腐蚀。

目前，国内外对硫沉积的研究主要集中在高含硫气井中碳素钢及合金钢的腐蚀机理及预测模型上[7-10]，主要腐蚀机理包括电化学、水解、催化及直接反应等。具有代表性的研究成果如：Zeng等[11]通过数学分析提出高含硫气井中S的溶解度与温度、压力、H_2S的含量及流速相关的模型，Zhang等[12]研究不同沉积物覆盖下的电偶腐蚀，指出硫沉积比其他沉积物 (沙子、泥土、FeS及$FeCO_3$) 腐蚀严重，并揭示硫沉积对基体材料破坏的机理。由于沉积硫对腐蚀产物膜的破坏具有一定的影响，而S对腐蚀产物膜的破坏机理研究还少见报道，故研究沉积硫下腐蚀产物膜层的破坏具有一定的实际意义。已有的研究[13,14]结果表明，酸性气田腐蚀产物膜中最常见的产物是$FeCO_3$和FeS，且温度和压力等因素变化会对$FeCO_3$和FeS膜的结晶状态产生影响，致使这两种腐蚀膜产物对基体的保护作用不同。目前，文献中多数方法都是采用高温高压条件下基体腐蚀成产物膜，为避免高压下危险且复杂的实验操作，本实验采用常压下电解法制备$FeCO_3$膜及溶液浸泡法制备FeS膜，所得表面膜组织结构和成分接近高压条件下自然形成的表面膜，并结合电化学阻抗 (EIS) 技术、极化曲线测试、静态挂片实验和环境扫描电镜 (ESEM) 观察等研究沉积硫层与腐蚀产物膜的相互作用规律。

2 实验方法

实验材料为L360碳钢，其化学成分 (质量分数，%) 为：C 0.16，Mn 1.60，Si 0.45，S 0.0015，P 0.25，V 0.06，Nb 0.05，Ti 0.04，Fe余量。尺寸为50 mm×10 mm×3 mm。样品经丙酮及无水乙醇除油后，干燥称重。将试样浸泡在80 ℃[15]的$NaHCO_3$溶液 (60 g $NaHCO_3$+400 mL H_2O) 中，施加恒定阳极电流 (约40 μA/cm^2) 电解48 h，利用高温下$NaHCO_3$水解生成CO_3^{2-}并与Fe^{2+}沉积于碳钢表面形成$FeCO_3$膜；将试样在80 ℃的Na_2S溶液 (30 g Na_2S +400 mL H_2O) 中浸泡48 h，通过S^{2-}水解生成H_2S并与基体反应形成FeS膜[16]。

EIS和极化曲线测试采用CS310S电化学工作站，在 (60±2) ℃条件下测试。采用三电极体系，辅助电极为Pt电极，参比电极为饱和甘汞电极 (SCE)，工作电极为L360碳钢试片 (Φ1 cm×1 cm)，工作电极用环氧树脂封装，留出有效工作面积0.785 cm^2。EIS谱测试频率范围为10^{-2}~10^5 Hz，激励信号为10 mV的正弦波 (相对于开路电位)。极化曲线扫描范围为开路电位下±250 mV，电位扫描速率为0.5 mV/s。

实验中所使用的腐蚀介质为模拟普光气田地层水溶液，主要组成 (mg/L) 为：K^+ 1.15×10^3，Na^+ 2.25×10^4，Ca^{2+} 2.28×10^3，Mg^{2+} 4.97×10^1，NH_4^+ 1.07×10^2，Cl^- 4.10×10^4，SO_4^{2-} 8.34×10^2，HCO_3^- 2.00×10^2。实验开始前向腐蚀介质中通N_2除氧4 h。静态腐蚀挂片及硫沉积腐蚀失重实验均在 (60±2) ℃的条件下进行，将L360试片置于装有现场模拟水溶液的500 mL广口瓶中，静置24 h后取出挂片，用腐蚀酸洗液浸泡2 min，去除表面腐蚀产物，乙醇干燥，冷风吹干，干燥后称重并计算腐蚀速率。硫沉积腐蚀失重实验中，试片用硅胶密封并留出有效工作面积4.717 cm^2，封装面固定于大小吻合容器中，纯S粉 (1.8 g) 平铺于有效工作面积上并压至厚度约2 mm，将整个装置平躺静置于广口瓶中。

实验所用表征手段包括X射线衍射仪 (XRD，X'Pert PRO)，能谱 (EDS，GENESIS) 分析，拉曼光谱仪Raman (VERTEX 70)，超景深三维显微镜系统 (VHX-1000) 和Quanta 200型ESEM，重在观察膜的结构及其在沉积硫下的腐蚀破坏规律。

3 结果与讨论

3.1 $FeCO_3$和FeS膜的结构、组成及表面形貌

3.1.1 XRD及Raman光谱分析 图1a为L360碳钢试片在$NaHCO_3$溶液中电解所制膜的XRD谱。图中出现了基体Fe (2θ=45°，65°和83°) 和$FeCO_3$ (2θ=24°，32°，42°和52°) 的衍射峰，说明膜的主要成分是$FeCO_3$，但膜存在缺陷。图1b为试片在Na_2S溶液中浸泡所制膜的Raman谱。图中出现了特征峰209 cm^{-1} (点阵模型导致的)，284 cm^{-1} (对称伸缩引起)，323和355 cm^{-1}，与文献中报道FeS的Raman谱图一致[17]，故制得的膜主要成分是FeS。

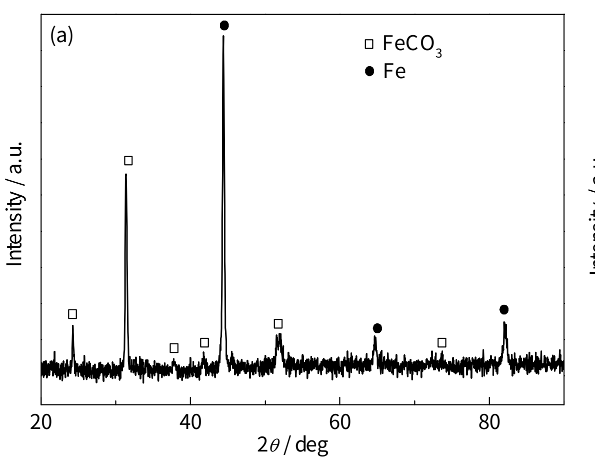
3.1.2 形貌分析 图2为L360试片在不同条件下制得膜的SEM像及膜中各元素的EDS分析结果。由图2a可见，$FeCO_3$膜局部出现裂缝，晶粒排列紧密、堆积紧凑且呈六方体；由图2b可以看出，溶液浸泡法制备的FeS膜无定型、分布疏散且容易脱落。此外，由于溶液离子强度较大致使FeS在形成和保存的过程中聚集在一起，增大了颗粒的尺寸[18,19]。图2c显示$FeCO_3$膜由两层构成，且外层膜比内层膜薄，与文献中报道在高压下形成的产物膜的结构特征基本相似[20]。图2d和e为两种膜的EDS分析结果。由图2d可以看出，Fe，C和O含量较高，膜中主要含有$FeCO_3$和铁氧化合物；图2e显示S，O和Fe含量较高，表明膜中主要含有铁硫化合物和铁氧化合物。此外，从图中Na的含量可以看出两种膜的致密度及渗透性存在差异，与形貌结果相呼应。

3.2 腐蚀失重分析

表1是通过静态腐蚀挂片得到的腐蚀速率。表中显示各种体系中的腐蚀速率大小(酸性>中性，硫沉积>无硫体系，裸片>FeS膜>$FeCO_3$膜)，比较腐蚀速率大小可知无硫存在时FeS膜和$FeCO_3$膜的耐蚀性较强，但在沉积硫下无论是$FeCO_3$膜或FeS膜都基本丧失了保护作用，相比较$FeCO_3$膜的保护作用稍优于FeS膜的。

3.3 电化学分析

3.3.1 EIS分析　　L360钢在模拟溶液中的EIS谱测试结果见图3。可以看出，反应电阻的大小为：无硫>硫沉积，$FeCO_3$膜>FeS膜>裸片。图中裸片和FeS膜的体系中，Nyquist图由双容抗弧组成，高频容抗弧是基体表面膜层引起的，低频容抗弧则是



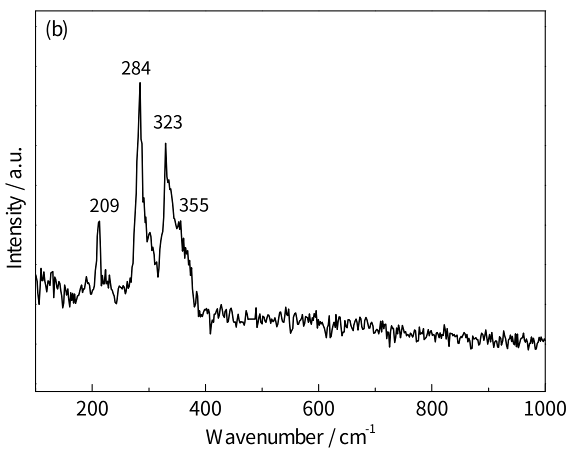


图1 L360碳钢试片在不同溶液中浸泡后所得膜的XRD和Raman谱

Fig.1 XRD pattern (a) and Raman spectrum (b) of the films formed duing electrolysis in $NaHCO_3$ solution and immersion in Na_2S solution, respectively

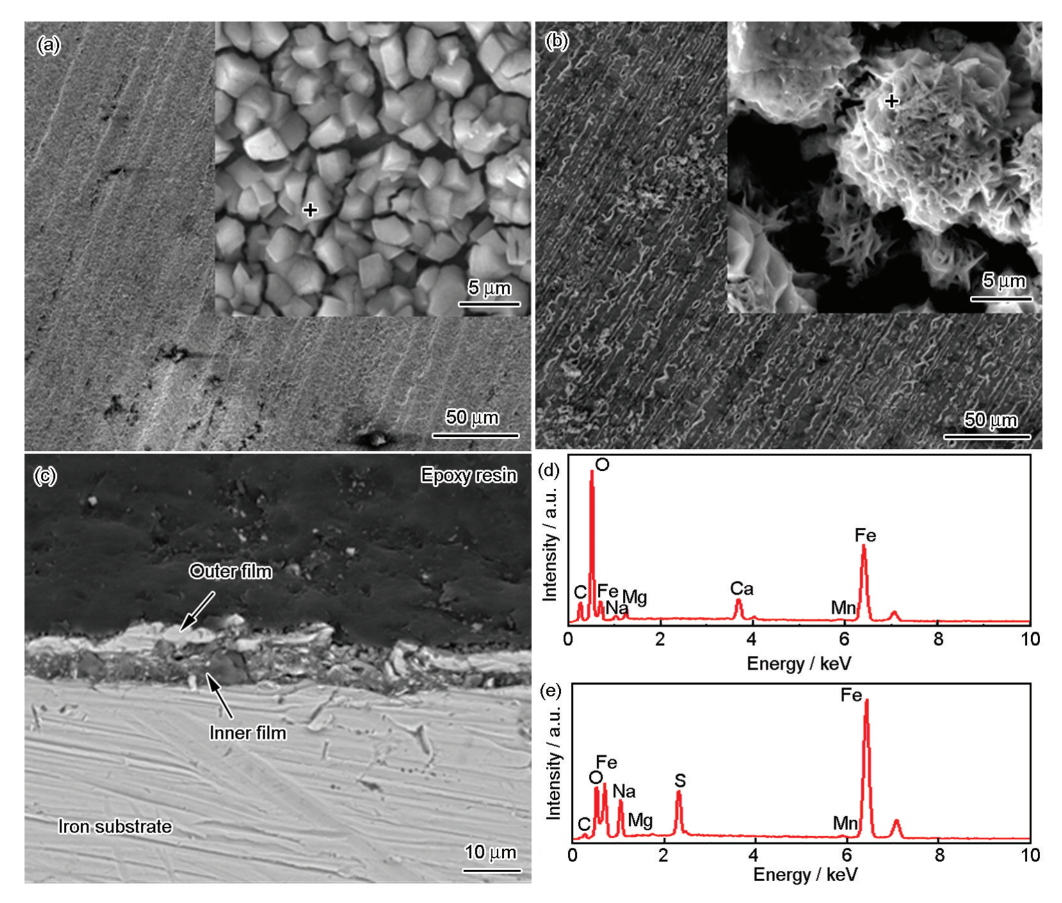


图2 膜的SEM像及EDS分析结果

Fig.2 SEM images of $FeCO_3$ film (a) and FeS film (b), cross-section microstructure of L360 steel with $FeCO_3$ film (C) and EDS results of $FeCO_3$ film (d) and FeS film (e)

表1 L360碳钢在模拟溶液中的腐蚀速率

Table 1 Corrosion rates of L360 carbon steel immersed in simulated solutions

Condition	Acidity	Corrosion rate / mm·a^{-1}		
		Without film	FeS film	$FeCO_3$ film
Without sulfur	pH=7	0.24	0.13	0.09
	pH=3	1.20	0.41	0.36
Sulfur deposition	pH=7	22.37	22.19	20.97
	pH=3	38.99	37.35	34.98

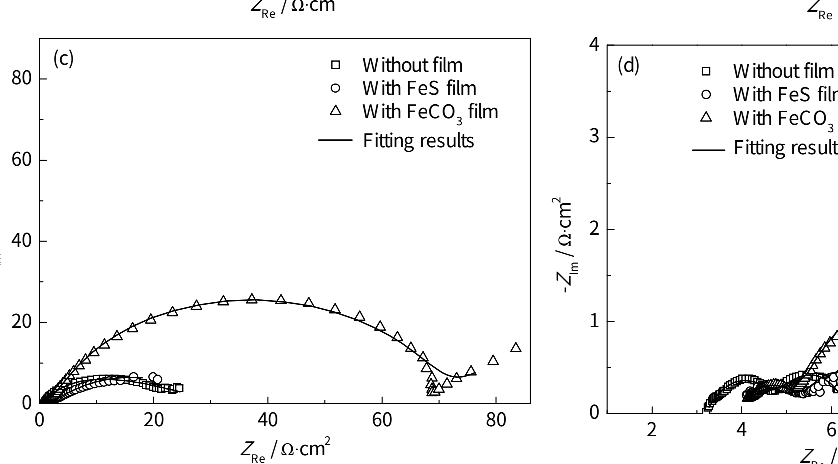
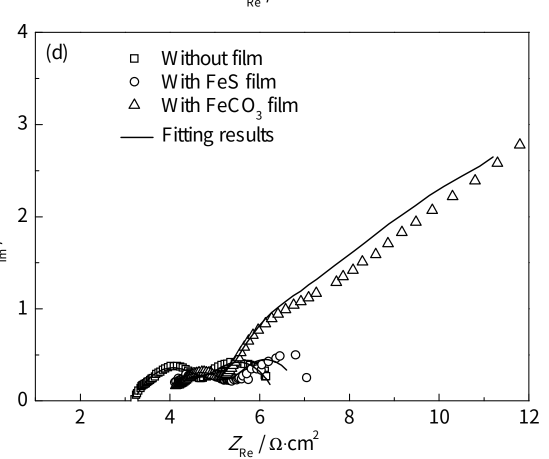
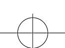



图3 L360碳钢在模拟溶液中的EIS谱

Fig.3 EIS Nyquist plots for L360 carbon steel immersed in simulated solutions: (a) sulfur free, pH=7; (b) sulfur deposition, pH=7; (c) sulfur free, pH=3; (d) sulfur deposition, pH=3

由介质与碳钢表面的双电层所致，高频容抗弧半径小说明电极表面的腐蚀产物膜不完整 (裸片) 或被破坏 (预FeS膜)。图中显示FeS膜的容抗弧比裸片大，说明FeS膜对基体起到了保护作用。这是由于S在水中水解生成的H_2S与S形成多硫化合物 (H_2S_{x+1})，多硫化物与基体反应生成FeS，故FeS膜的破坏和形成属于一个动态过程，其阻碍了阴极H还原成H_2，从而阻碍了基体的腐蚀。$FeCO_3$膜的耐蚀性最好，是由于60 ℃时$FeCO_3$的溶解性很差，且$FeCO_3$初生膜的电阻很大[20]，故保护性最强，这与拟合参数的结果 (表2) 和失重结果 (表1) 均一致。图3c和d中$FeCO_3$膜试片的阻抗谱表现为一条与45°角相近的斜线段，可能是由于酸性条件下$FeCO_3$膜局部被破坏形成了宏观孔加速了电极表面的腐蚀，此时基底金属的腐蚀反应受扩散控制。此外，图3b中可明显看出$FeCO_3$膜体系中存在半径小的高频容抗弧和两个半径大的低频容抗弧，而图3d中$FeCO_3$膜的Nyquist图由双容抗弧和扩散组成，这是由于中性条件下$FeCO_3$初生膜被破坏，但次生膜还处于完整状态，故基体表面仍存在两层膜，即腐蚀产物膜和$FeCO_3$内层膜。pH值为3时，$FeCO_3$膜完全被硫粉破坏，基体表面只存在一层腐蚀产物膜。



L360碳钢在不同体系中具有不同的腐蚀形态，根据图3中Nyquist图提出3种等效电路，见图4。图中，R_s指溶液电阻，Q_{dl}为双电层电容，R_f为膜电阻，Q_f为膜电容，R_{ct}为传质电阻，R_{f1}为内层膜(靠近基体)电阻，Q_{f1}为内层膜电容，R_{f2}为外层膜电阻，Q_{f2}为外层膜电容，W表示有限扩散阻抗。裸片与FeS膜试片在体系中发生均匀腐蚀，电极表面形成一层较均匀的腐蚀产物膜，因此其等效电路见4a。中性体系中，$FeCO_3$膜没有或部分被破坏，存在双层膜结构，因此其等效电路图见4c[20]。pH值为3时，根据腐蚀截面形貌及图3中出现的扩散，其等效电路见4b。

本实验将极化电阻R_p定义为$R_p=R_{ct}+R_f$[21]。由于中性体系下$FeCO_3$膜试片外层膜电阻值远小于内层的，故忽略R_{f2}，即$R_p=R_{ct}+R_{f1}$。R_p的大小反映基体腐蚀速率大小，R_p越大，金属遭受腐蚀程度越轻；反之，R_p越小，腐蚀越严重。由表2可知，酸性体系的R_p小于中性体系的，且沉积硫条件下的最小，由此说明酸性条件下硫沉积腐蚀最严重。此外，R_p整体满足规律：$FeCO_3$膜＞FeS膜＞裸片，说明$FeCO_3$膜和FeS膜对基体均有一定的耐蚀性，与失重数据结果一致。

3.3.2 极化曲线分析　L360碳钢在不同体系中测得的动电位极化曲线见图5。相应的拟合后的R_p及腐蚀电流密度见图6。图5显示，与中性、无硫体系相比，酸性、硫沉积条件下测得的极化曲线均明显上移，与拟合得到的R_p和腐蚀电流密度结果一致(见图6)，这是由于硫粉加速了阴、阳极反应[22]。同时，与裸片相比，pH值为7时FeS和$FeCO_3$膜条件下阳极斜率降低，说明两种膜是通过抑制阳极反应降低反应速率；pH值为3时则是通过抑制阴极反应降低反应速率，这可能是由于中性条件下膜没有破坏，阻断了基体与溶液接触，而酸性条件下膜的溶解速率大于腐蚀产物膜的生成速率，致使基体表面形成一层厚且蓬松的腐蚀产物层，从而阻碍了H^+的传输通道，抑制了阴极反应。沉积硫下，FeS和$FeCO_3$膜一定程度上减弱了基体腐蚀，但腐蚀速率降低不明显，可能是由于硫化物的形成一方面阻碍了溶液渗透，另一方面破坏了原膜，减弱了电极的极化作用。

3.4 腐蚀形貌和三维立体显微镜分析

图7是$FeCO_3$膜试片在pH值为7和3的模拟溶液中硫沉积腐蚀后的ESEM像。图中表明，中性溶液中$FeCO_3$膜在沉积硫下发生局部腐蚀，且基体表面存在双层膜(内层膜和腐蚀产物膜)结构；而在酸性溶液中$FeCO_3$膜完全被破坏，基体表面只存在一层厚且蓬松的腐蚀产物膜。

图8是L360试片沉积硫腐蚀后的三维显微形貌。可以看出pH值为7时，裸片属于均匀腐蚀，预膜试片则发生局部腐蚀，其中$FeCO_3$膜局部腐蚀最严重；pH值为3时，裸片和预膜试片则发生均匀腐蚀(微观比较局部腐蚀程度为：$FeCO_3$膜＞FeS膜＞裸片)。硫粉与基体亲和力较膜强，故硫粉与基体接触均匀；另外碳钢表面具有催化活性，S可能与溶液中H^+生成H_2S，经催化形成的H_2S吸附在钢表面加速腐蚀[23]，这与测得的腐蚀速率相对应。pH值为7时，$FeCO_3$膜试片局部腐蚀严重，是由于膜本身的缺陷(存在裂缝，如图2a)造成电位极度分布不均匀而引起的，且不同区域膜的厚度存在差异(图2b)，溶液渗

表2 L360碳钢在模拟溶液中的EIS谱拟合电化学参数R_{ct}, R_{f1}及R_p的值

Table 2 Fitted values of R_{ct}, R_{f1} and R_p of EIS of L360 carbon steel immersed in simulated solutions

Condition	R_{ct} / Ω·cm²			R_{f1} / Ω·cm²			R_p / Ω·cm²		
	Without film	With FeS film	With $FeCO_3$ film	Without film	With FeS film	With $FeCO_3$ film	Without film	With FeS film	With $FeCO_3$ film
Without sulfur pH=7	186.70	258.90	392.60	31.31	52.29	77.62	218.01	311.19	470.22
Without sulfur pH=3	23.77	28.73	59.85	3.50	2.10	9.30	27.27	30.83	69.15
Sulfur deposition pH=7	3.26	3.44	5.56	1.43	1.61	1.95	4.69	5.06	7.51
Sulfur deposition pH=3	1.58	1.88	5.12	1.56	1.57	1.07	3.15	3.45	6.18

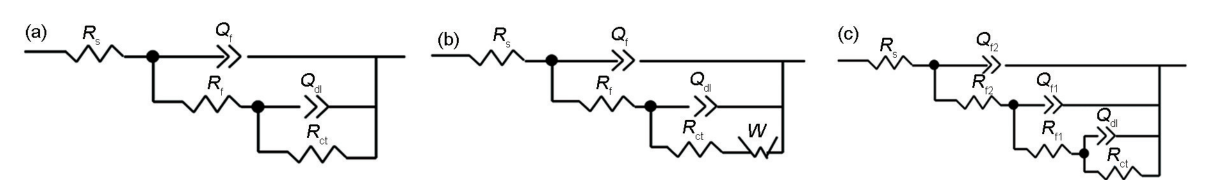
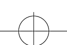


图4 L360碳钢在模拟溶液中的电化学阻抗谱等效电路图

Fig.4 Equivalent circuits of impedance diagrams for EIS spectra of L360 carbon steel immersed in simulated solutions without film and with FeS film (a), with $FeCO_3$ film, pH=3 (b) and with $FeCO_3$ film, pH=7 (c)



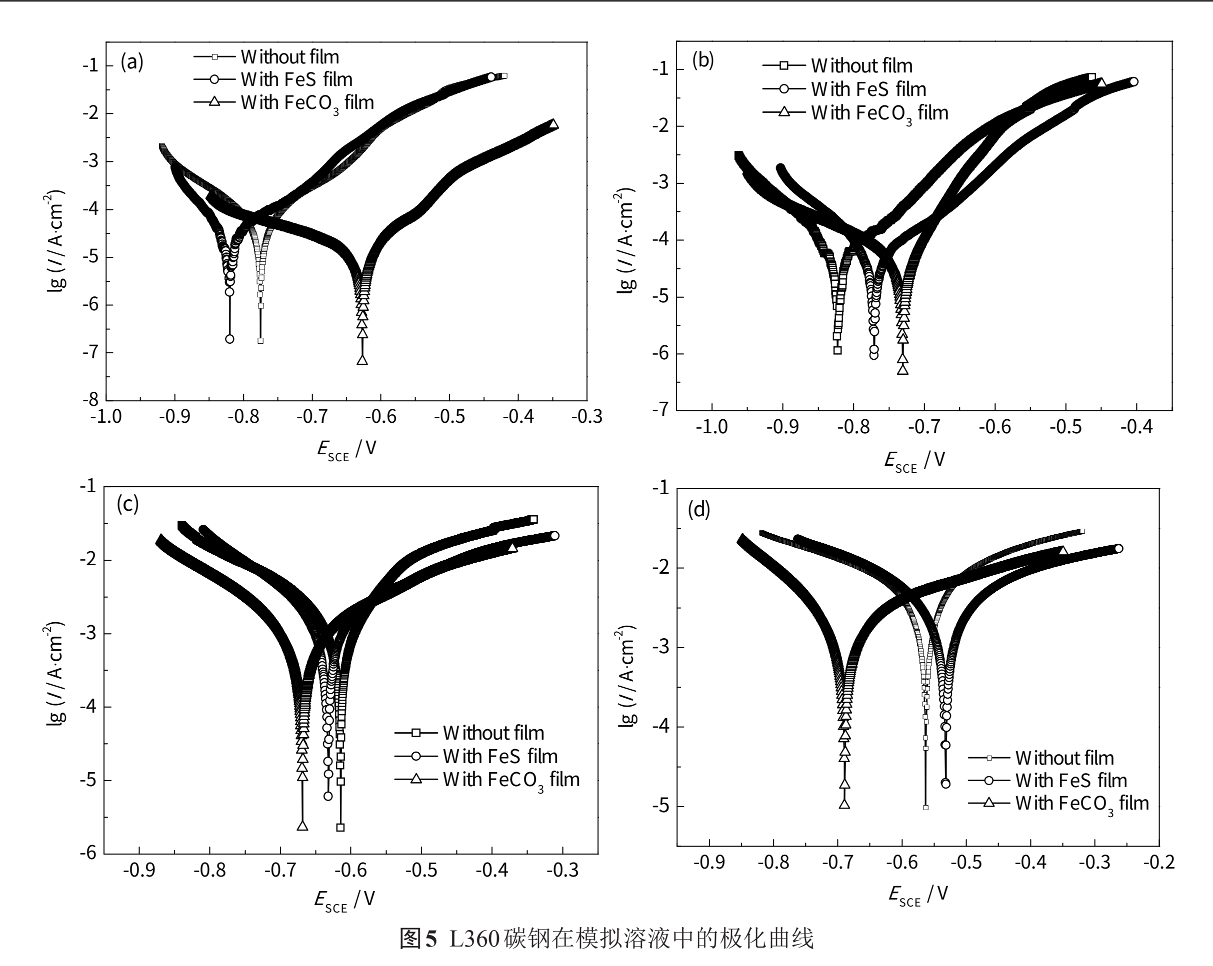


图5 L360碳钢在模拟溶液中的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of L360 carbon steel immersed in simulated solutions: (a) sulfur free, pH=7; (b) sulfur free, pH=3; (c) sulfur deposition, pH=7; (d) sulfur deposition, pH=3

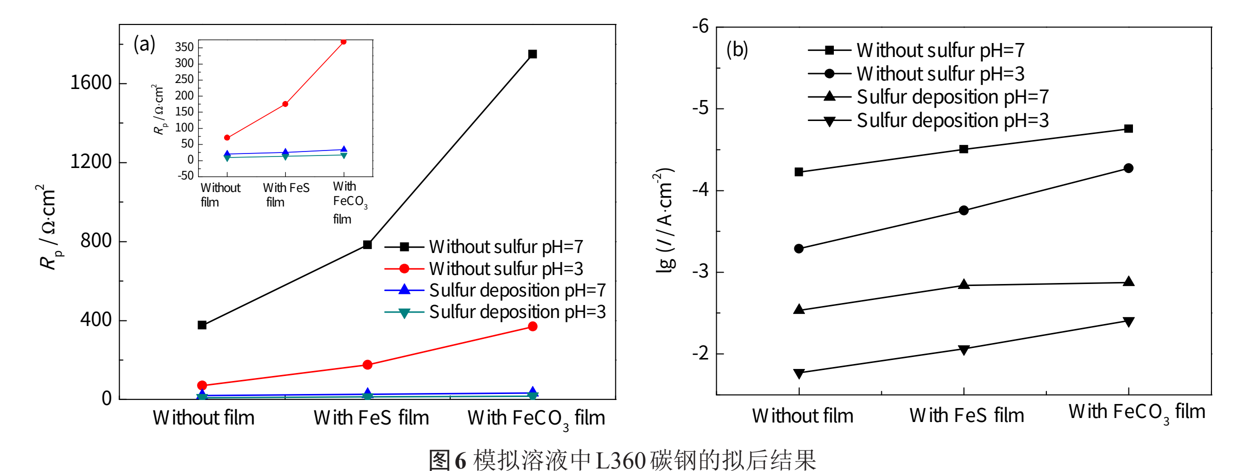


图6 模拟溶液中L360碳钢的拟后结果

Fig.6 Fitting results of polarization resistance R_p (a) and corrosion current density I_{corr} (b) of L360 carbon steel immersed in simulated solutions

透性也存在差异，故由膜本身覆盖度不同而形成具有很强自催化作用的腐蚀电偶加速了局部腐蚀[14]。此外 $FeCO_3$ 膜试片局部腐蚀区域较大，且边缘腐蚀较严重 (图8d)，可能是由于一方面膜边缘附着力较差，溶液穿透力强，从而与膜附着力强的区域构成了电偶腐蚀；另一方面是因为试片腐蚀的阴极反应产生 H_2，冲刷了钢片边缘使得膜发生脱落，这与图7a中A点存在 $FeCO_3$ 膜而B点不存在相吻合。中性条件下，FeS膜试片发生均匀腐蚀是因为膜本身疏松，溶液能均匀地透过，各点电位基本一致从而减轻了电偶腐蚀。

pH值为3时，沉积硫下 $FeCO_3$ 和FeS膜溶解速率均较快，基体表面形成的腐蚀产物主要成分是铁硫化合物，减弱了局部腐蚀，同时却加速了整体腐

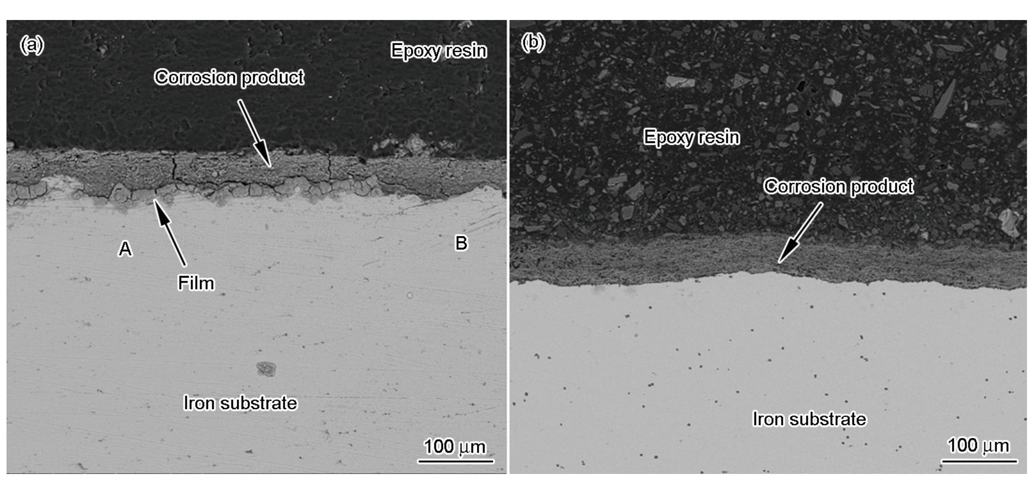


图7 $FeCO_3$膜试片沉积硫腐蚀截面形貌图

Fig.7 SEM micrographs of the cross-section microstructure of L360 steel with $FeCO_3$ film after immersion in solutions with pH=7 (a) and pH=3 (b)

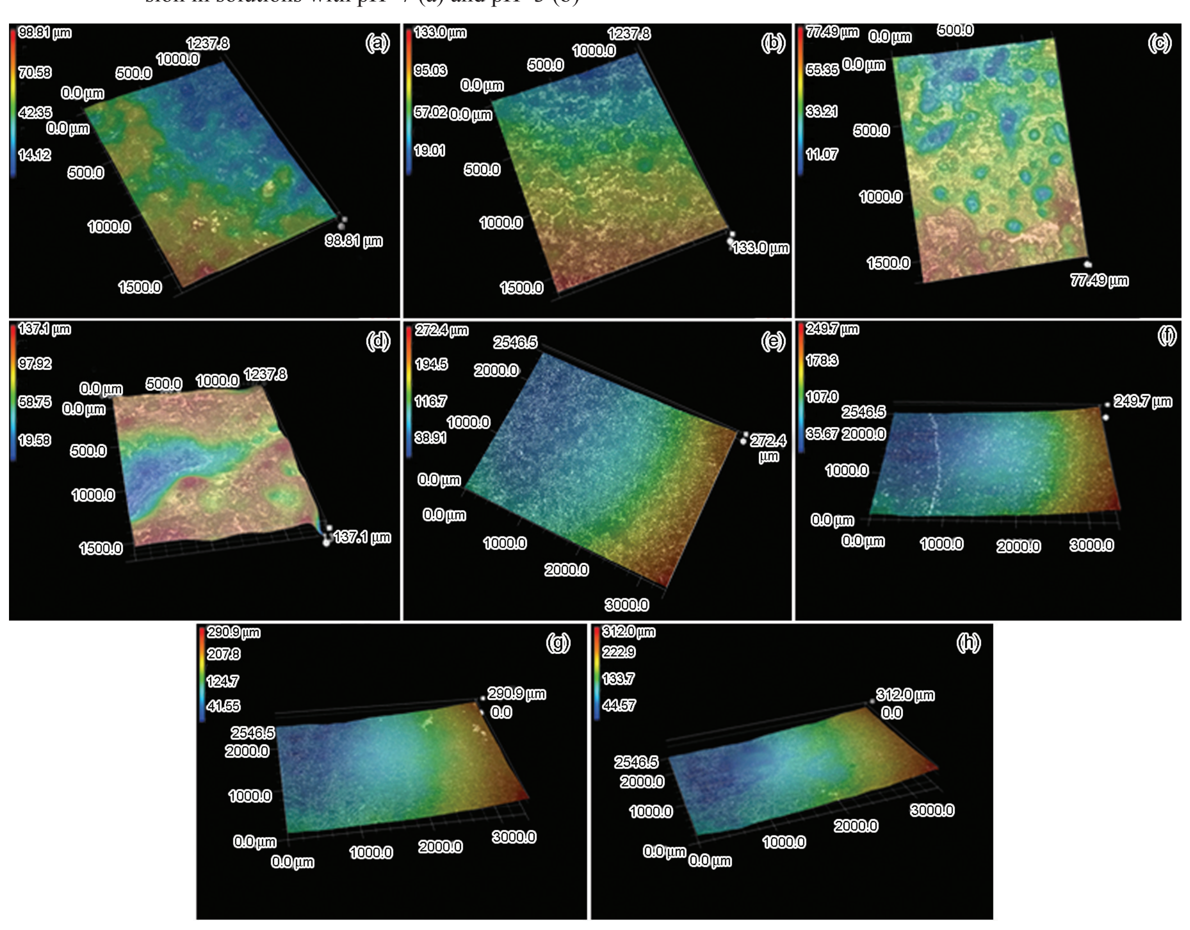


图8 L360碳钢硫沉积腐蚀形貌图

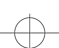
Fig.8 Morphologies of L360 carbon steel after corrosion under sulfur deposition: (a) without film, pH=7; (b) FeS film, pH=7; (c) $FeCO_3$ film, pH=7; (d) the edge of steel with $FeCO_3$ film, pH=7; (e) without film, pH=3; (f) FeS film, pH=3; (g) $FeCO_3$ film, pH=3; (h) the edge of steel with $FeCO_3$ film, pH=3

蚀。此外,基体局部出现小尺寸麻点形腐蚀坑,是由于沉积硫下硫化物的生成,而硫化物又能促进多种其他腐蚀产物 (Fe_3S_4和FeS_2等) 的形成,产物及基体之间构成微小的自催化闭塞电池,从而加速局部腐蚀。

4 结论

(1) $FeCO_3$和FeS膜在无硫条件下对基体具有一定的保护作用,其中$FeCO_3$膜较FeS膜保护性能好。

(2) 沉积硫条件下$FeCO_3$和FeS膜保护作用微弱,相对而言$FeCO_3$膜的耐蚀性比FeS膜好,且





$FeCO_3$膜试片的局部腐蚀较FeS膜试片的严重。

(3) pH值为7时，$FeCO_3$膜试片局部腐蚀倾向大、蚀孔深、面积大，且腐蚀从边缘(膜的薄弱区域)开始扩展，而FeS膜试片及裸片腐蚀较均匀；pH值为3时，$FeCO_3$和FeS膜试片均属于均匀腐蚀，且腐蚀程度深。

参考文献

[1] Smith P, Roy S, Swailes D, et al. A model for the corrosion of steel subjected to synthetic produced water containing sulfate chloride and hydrogen sulfide [J]. Chem. Eng. Sci., 2011, 66(23): 5775

[2] Fenn M E, Ross C S, Schilling S W, et al. Atmospheric deposition of nitrogen and sulfur and preferential canopy consumption of nitrate in forests of the Pacic Northwest, USA [J]. Forest. Ecol. Manage., 2013, 302: 240

[3] Hu J H, He S L, Zhao J Z, et al. Sulfur deposition experiment in the presence of non-movable water [J]. J. Pet. Sci. Eng., 2012, 100: 37

[4] Endo T, Yagoh H, Sato K, et al. Regional characteristics of dry deposition of sulfur and nitrogen compounds at EANET sites in Japan from 2003 to 2008 [J]. Atmos. Environ., 2011, 45(6): 1259

[5] David J P. Elemental sulfur formation in natural gas transmission pipelines [D]. Australia: The University of Western Australia, 2005

[6] Pack D J, Parks D W, Chesnoy A B. Gas pipeline preferential site selection occurrence for elemental sulphur & other particle matter formation & deposition [J]. J. Petrol. Sci. Eng., 2012, 94: 12

[7] Zhang D T. Elemental sulfur deposition and corrosion mechanism research on high sour gas field gathering and transportation system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012
(张大同. 高酸性气田集输系统元素硫沉积及腐蚀机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012)

[8] Fan Z, Li H C, Liu J Y, et al. The elemental sulfur deposition and its corrosion in high sulfur gas fields [J]. Nat. Gas Ind., 2013, 33(9): 102
(范舟, 李洪川, 刘建仪等. 高含硫气田元素硫沉积及其腐蚀 [J]. 天然气工业, 2013, 33(9): 102)

[9] Xu Y M, Guo P, Huang W G. Study on deposition of element sulfur for hgh sulfurous gas reservoirs [J]. Nat. Gas Explor. Dev., 2005, 27(4): 52
(徐艳梅, 郭平, 黄伟岗. 高含硫气藏元素硫沉积研究 [J]. 天然气勘探与开发, 2005, 27(4): 52)

[10] Zhu Z J, Sand K W, Teevens P J. A numberical study of under-deposit pitting corrosion in sour petroleum pipelines [A]. NACE International [C]. Houston, 2010

[11] Zeng S P, Wen Y X, Zhang Q M, et al. Investigating on the prediction model of sulfur deposition in high sour gas-well [J]. Procedia Eng., 2012, 29: 4267

[12] Zhang G A, Yu N, Yang L Y et al. Galvanic corrosion behavior of deposit-covered and uncovered carbon steel [J]. Corros. Sci., 2014, 86: 202

[13] Palacios C A, Shadley J R. CO_2 corrosion of N80 steel at 71 ℃ in a two-phase flow system [J]. Corros. Sci., 1993, 49(8): 686

[14] Zhang Q, Li Q A, Wen J B, et al. Progress in research on CO_2/H_2S corrosion of tubular goods [J]. Corros. Prot., 2003, 24(7): 277
(张清, 李全安, 文九巴等. CO_2/H_2S对油气管材的腐蚀规律及研究进展 [J]. 腐蚀防护, 2003, 24(7): 277)

[15] Lin G F, Bai Z Q, Zhao X W, et al. Effect of temperature on scales of carbon dioxide corrosion products [J]. Acta Petrolei. Sin., 2004, 25(3): 101
(林冠发, 白真权, 赵新伟等. 温度对二氧化碳腐蚀产物膜形貌特征的影响 [J]. 石油学报, 2004, 25(3): 101)

[16] Ma H, Cheng X, Li G, et al. The influence of hydrogen sulfide on cossosion of iron under different conditions [J]. Corros. Sci., 2000, 42(10): 1669

[17] Bourdoiseau J A, Jeannin M, Sabot R, et al. Characterisation of mackinawite by Raman spectroscopy: Effects of crystallisation, drying and oxidation [J]. Corros. Sci., 2008, 50(11): 3247

[18] Zhang Y, Moloney J. Corrosion monitoring under iron sulfide deposit: Testing method development [A]. NACE International [C]. Houston, 2014

[19] Herbert R B, benner S G, Pratt A R, et al. Surface chemistry and morphology of poorly crystalline iron sulfides precipitated in media containing sulfate-reducing bacteria [J]. Chem. Geol., 1998, 144(1): 87

[20] Gao M, Pang X, Gao K. The growth mechanism of CO_2 corrosion production films [J]. Corros. Sci., 2011, 53(2): 557

[21] Tan Z H, Zhu Z P, Pei F, et al. Influence of DC stray current on corrosion behavior of grounding grid materials in soils with different moisture content [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2013, 25(3): 207
(谭铮辉, 朱志平, 裴峰等. 直流杂散电流对不同含水率土壤中接地网材料腐蚀特性的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(3): 207)

[22] Liang R J, Liu L W, Han Y L. Sulfur deposition on corrosion of N80 carbon steel in high acid environment [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2013, 25(3): 184
(梁荣晶, 刘烈炜, 韩燕玲. 高酸性条件下S沉积对N80碳钢腐蚀的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(3): 184)

[23] Yang B, Tian S B, Zhao S L. Study of corrosivity of different sulfur compounds of crude oil [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2005, 17(6): 385
(杨波, 田松柏, 赵杉林. 不同形态硫化合物腐蚀行为的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(6): 385)

